第Ⅰ部門　　地盤内に直埋設されたベローズ継手の引張変形解析における地盤相互作用力のモデル化手法

京都大学大学院工学研究科　学生員　○髙山真太郎　　正会員　古川　愛子
日本ニューロン株式会社　　正会員　　金丸　佑樹　　正会員　小池　　武

１．研究背景と目的

金属薄板を波形加工したベローズ型可撓継手（以降、ベローズ）は、配管系の変位吸収部材として広く利用されている。一般的な埋設施工では保護用の外筒が配置されるが、近年では施工コスト削減の観点から地盤への直埋設が検討されている。これに伴い、直埋設されたベローズに引張変位が作用した際の変形特性および周辺地盤との相互作用メカニズムの解明が不可欠となっている [1)]。そこで本研究では、まず、土槽試験を実施し、直埋設ベローズの引張変形挙動を把握する。次に、デジタル画像相関法（DIC）を用いた動画像解析結果に基づき、地盤がベローズに及ぼす相互作用力（土圧・摩擦・地盤反力）を節点荷重としてモデル化する手法を提案する。さらに、土槽試験の再現解析を行い、実験結果との比較により提案手法の妥当性を検証する。最終的に、提案した相互作用力のモデル化手法を口径および土被りの異なる管状ベローズへ適用し、直埋設状態における引張時の座屈および引張破壊の発生を評価する。

２．土槽試験概要

平板に波形加工を施した平板ベローズ試験体（SUS304）を対象として土槽試験を実施し、試験体の引張変形挙動および周辺地盤の挙動を把握した。土槽の内寸は長さ 800 mm，奥行き 300 mm であり、ベローズ試験体の波形部は 1 山の幅が 50 mm、高さが 50 mm の 5 山構成である。使用した豊浦砂の密度は 1432.16 kg/m³、相当土被りは 651.54 mm である。試験体左端を固定し、右端に右方向の強制変位を与えた。引張変位の増加に伴うベローズ各山の変形を観察したところ、図 2(a)に示すように、山ごとに不均一な開きが生じ、載荷端側の山ほど開き量が大きく、特に最も載荷端側の山で顕著な開きが確認された。

３．土槽試験画像解析による相互作用力のモデル化手法の提案と妥当性検証

土槽試験における引張変形挙動を DIC により解析した結果（図 2(b)）、ベローズ前方（載荷端側）の地盤において、山頂部を通過する形で明確なすべり面が発達することが確認された。これを受けて、地盤がベローズに及ぼす相互作用力を、(a) 土被りに応じた上載土圧、(b) 地盤－ベローズ間の摩擦力、(c) 載荷端側の山部に作用する前方地盤反力、(d) すべり面上の土粒子間摩擦力に分類（図 3）し、それぞれを節点荷重としてベローズの解析モデルに与える方法を提案する。ベローズ試験体の解析モデルを図 4 に示す。

(b)の地盤－ベローズ間の摩擦係数が不明であるため、0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 の 5 通りで解析を実施した。各ケースにおいて、荷重—変位関係が実験結果と概ね一致するように(c)の前方地盤反力を設定し、変位－山頂部間の開き量関係を

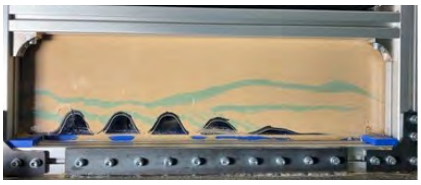


(a) ベローズ本体

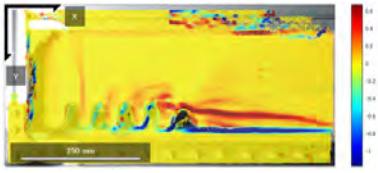


(b)外筒付き
ベローズ継手

図 1 ベローズ継手



(a) 載荷終了時の平板ベローズの
変形挙動



(b) DIC によって得られた
せん断ひずみ様子

図 2 土槽実験の結果

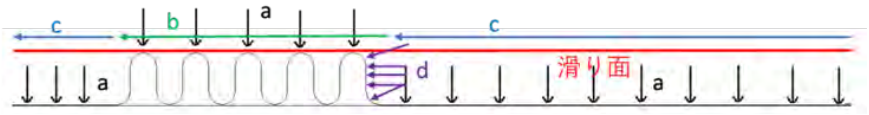


図 3　地盤がベローズに及ぼす相互作用力

Shintaro TAKAYAMA, Aiko FURUKAWA, Yuuki KANAMARU, Takeshi KOIKE
takayama.shintaro.55v@st.kyoto-u.ac.jp

比較した。その結果、摩擦係数の増大につれて載荷端側の山部の開口が極端に大きくなる傾向が確認された。一方、摩擦係数を 0.2 に設定した場合に、実験で観察された荷重－変位関係および各山の開き量の双方が最も良好に一致した。以上より、提案した地盤相互作用力のモデル化手法の妥当性を確認するとともに、本試験条件では地盤－ベローズ間の摩擦係数として 0.2 の採用することが妥当であると判断した（図 5, 6）。

４．3 次元管状ベローズ継手の引張解析

前章で検証した地盤相互作用力のモデル化手法および摩擦係数を適用し、管状ベローズ継手を対象とした数値解析を行った。検討モデルとして、口径 300mm、650mm、1100mm の 3 種類を設定し、土被りを 1.2m および 3.0m の 2 水準とした。解析モデルを図 7 に示す。左端を固定し、右端にベローズが平坦となるまでの理論引張限界変位を与えた。解析結果を表 1 に示す。口径 300mm（土被り 1.2m、3.0m）および 650mm（土被り 1.2m）では理論引張限界変位でも座屈も引張破壊も生じなかったのに対し、口径 650mm（土被り 3.0m）および 1100mm（土被り 1.2m、3.0m）では理論引張限界変位に達する前に荷重－変位関係の荷重がピークを示し、その後急激に低下した。また、荷重ピーク付近では局所的に引張応力が材料の引張強度を超過するとともに、断面の扁平化を伴う座屈座屈挙動が確認された。以上より、口径の増大および土被りの増加に伴い、引張強度の超過や座屈が生じやすくなる傾向が示された。

５．結論

地盤に直埋設されたベローズ継手の引張挙動に関し、土槽試験および有限要素解析による検討を行った。 地盤による各種相互作用力（土圧・摩擦・前方地盤反力）を節点荷重として考慮することで、ベローズの引張変形挙動を再現できることを示した。 また、管状ベローズの 3 次元解析に提案手法を適用することで、口径および土被り条件に応じた座屈の発生ならびに引張応力の引張強度超過を評価できることを示した.

参考文献 1) 楢原新山，古川愛子，金丸佑樹，小池武：直埋設条件におけるベローズ継手の Spangler 式，第 80 回土木学会年次学術講演会，11AM1-Xo-01，2025 年.

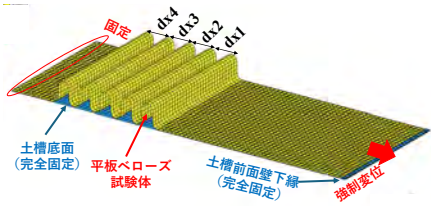


図 4 土槽実験の解析モデル

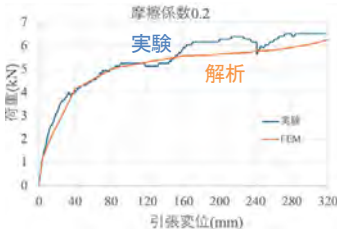
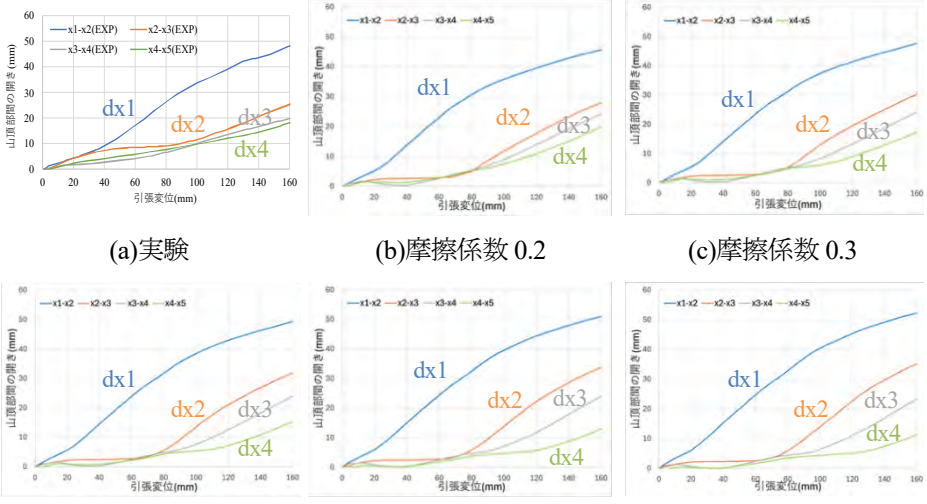


図 5 荷重-変位関係の比較（摩擦係数 0.2）



(a)実験　(b)摩擦係数 0.2　(c)摩擦係数 0.3

(d)摩擦係数 0.4　(e)摩擦係数 0.5　(f)摩擦係数 0.6

図 6 摩擦係数別の引張変位-山頂部間開きの関係（前方から dx1, dx2, dx3, dx4）

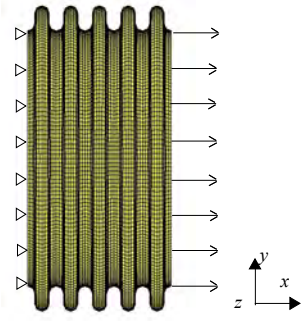


図 7 管状ベローズの解析モデル（口径 300mm）

表 1 口径，土被り条件毎の降伏，座屈，引張強度超過時の引張変位

口径 (mm)	土被り (mm)	降伏時 (mm)	座屈発生時 (mm)	引張強度超過時 (mm)
300	1200	2.53	発生しない	発生しない
	3000	2.53	発生しない	発生しない
650	1200	3.54	発生しない	発生しない
	3000	3.54	297.0	発生しない
1100	1200	4.41	359.7	361.7
	3000	4.41	317.6	312.5